

УДК 621.396.671.8

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ АДАПТИВНОГО КОМПЕНСАТОРА
С КОРРЕЛЯЦИОННЫМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ
ПРИ ФЛУКТУАЦИЯХ УГЛА ПРИХОДА ПОМЕХИ**

Л. Г. Седин, А. С. Мазманішвили

Исследовано поведение выходного напряжения адаптивного автокомпенсатора помех при различного рода флуктуациях углов прихода (фаз помехи). Показано, что постоянная времени автокомпенсатора должна быть меньше, чем это следует из анализа переходного процесса включения.

Эффективность адаптивных антенн существенно зависит от быстродействия системы автоматического подавления мешающих сигналов. В реальных условиях, когда направления прихода сигналов непрерывно изменяются из-за изменения положения их источников и флуктуаций коэффициента преломления в среде распространения (тропосфера, ионосфера, космическая плазма), недостаточное быстродействие компенсатора приводит к ухудшению качества адаптации.

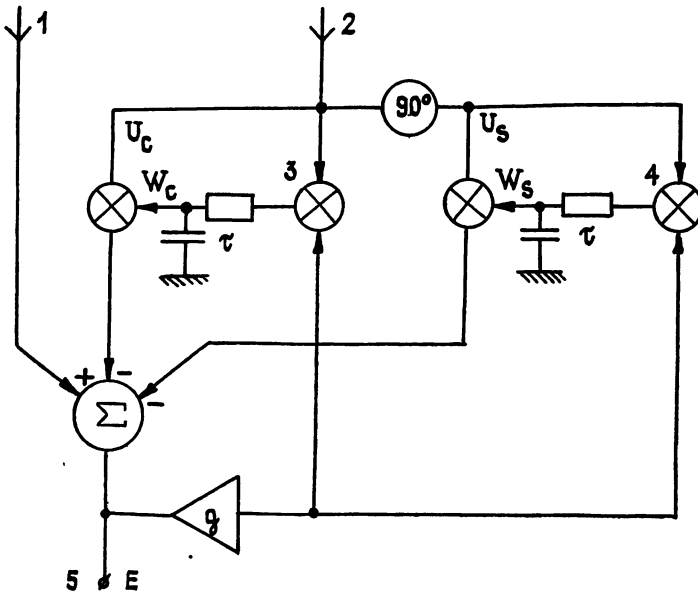


Рис. 1. Схема автокомпенсатора:
1 — вход основного канала, 2 — вход компенсационного канала, 3 — перемножитель косинусного канала, 4 — перемножитель синусного канала, 5 — выход автокомпенсатора.

В работах, посвященных исследованию динамических свойств адаптивных компенсаторов, обычно ограничиваются анализом переходного процесса включения помехи [1]. Такой анализ показывает, что скорость реакции автокомпенсатора растет в G раз (G — эффективный коэффициент статического ослабления помехи) по сравнению с его собственной постоянной времени. Однако исследование переходного

процесса не может полностью описать реальное быстроедействие системы. Поскольку основное уравнение адаптации — это дифференциальное уравнение, коэффициенты которого нелинейно зависят от сигнала (или аналогичное ему разностное уравнение градиентного поиска), реальное быстроедействие должно зависеть от характера (спектра) флуктуаций сигнала.

В настоящей работе подробно исследуется классический двухэлементный автокомпенсатор с корреляционными обратными связями в квадратурных подканалах (рис. 1). Рассмотрена его реакция на помеху, угол прихода которой изменяется со временем регулярно либо стохастически, когда напряжения помехи в каналах изменяются «недружно». Случай «дружных» флуктуаций (вызванных, например, модуляцией помехи) исследовался в публикациях А. Н. Малахова, А. А. Мальцева, А. И. Саичева, И. Е. Позументова и других авторов (см. в частности, [2]).

В работе рассмотрено воздействие одной квазигармонической помехи (фаза изменяется медленно сравнительно с периодом несущей частоты). Предполагается, что полезный сигнал из системы автокомпенсации исключен применением какой-либо разновидности схемы «защиты сигнала».

Исходные уравнения. Как следует из схемы рис. 1, выходное напряжение E связано с входными U_0 , U_s , U_c и весами квадратурных подканалов соотношением $E = U_0 - W_c U_c - W_s U_s$. Для удобства введем комплексный вес $W = W_c + iW_s$. Тогда

$$E = U_0 - W U_k; \quad (1)$$

$$\tau \dot{W} + (1 + g |U_k|^2) W = g U_0 U_k^*. \quad (2)$$

Полагая, что начало работы автокомпенсатора отнесено к $t_0 = -\infty$, запишем решение (2) в виде

$$W(t) = \frac{g}{\tau} \int_{-\infty}^t U_0(x) U_k^*(x) \exp \left[-\frac{1}{\tau} \int_x^t (1 + g |U_k(y)|^2) dy \right] dx. \quad (3)$$

Если характерное время τ_c изменения помехи существенно больше постоянной времени автокомпенсатора τ , в (2) можно положить $\tau = 0$. Тогда

$$W = \frac{g U_0 U_k^*}{(1 + g |U_k|^2)}, \quad E = \frac{U_0}{1 + g |U_k|^2} = \frac{U_0}{G}.$$

Это безынерционный режим, в котором автокомпенсатор обеспечивает статистическое подавление помехи в $G = 1 + g |U_k|^2$ раз. В другом крайнем случае, когда $\tau_c \ll \tau$, действие фильтров приводит к усреднению выходных напряжений перемножителей, и вместо (2) можно записать

$$\tau \dot{W} + (1 + g \langle |U_k|^2 \rangle) W = g \langle U_0 U_k^* \rangle.$$

Теперь получается уравнение с постоянными коэффициентами. Из него следует эффективная постоянная времени $\tau_0 = \tau/G \ll \tau$, и при $t \gg \tau_0$

$$W(t) = g \langle U_0 U_k^* \rangle (1 + g \langle |U_k|^2 \rangle)^{-1}.$$

Если сигналы U_0 и U_k флуктуируют «дружно», например, если причиной флуктуации является модуляция помехи, т.е. $U_k(t) = k U_0(t)$, где k — постоянная комплексная величина, эффективность адаптации остается достаточно высокой. Но, если флуктуации основного и компенсационного канала будут некоррелированы, $\langle U_0 U_k^* \rangle \rightarrow 0$, автокомпенсации в случае $\tau \gg \tau_c$ практически нет.

Динамика компенсации при изменении углов прихода. Положим, что амплитуды U_0 и U_k одинаковы, а фазы различны и переменны из-за изменения угла прихода помехи:

$$U_0 = U, \quad U_k = U \exp[i\varphi(t)].$$

Тогда из (3) получим

$$W(t) = g U^2 \tau^{-1} \int_{-\infty}^t \exp\left[\frac{x-t}{\tau_0} - i\varphi(x)\right] dx, \quad (4)$$

где

$$\tau_0 = \tau / (1 + g|U|^2). \quad (5)$$

1. Пусть угол прихода помехи изменяется регулярно, так что $\varphi(t) = \varphi_0 t / \tau_c$. Тогда из (4) имеем $W(t) = g U^2 \exp(-i\varphi_0 t / \tau_c) (G - i\varphi_0 \tau / \tau_c)^{-1}$,

$$\frac{|E|}{U} = \left| \frac{1 - i\varphi_0 \tau / \tau_c}{G - i\varphi_0 \tau / \tau_c} \right| \approx \frac{1}{G} \sqrt{1 + \varphi_0^2 \tau^2 / \tau_c^2}, \quad (6)$$

где сделано естественное предположение, что $G \gg \varphi_0 \tau / \tau_c$. Соотношение (6) показывает, что рост $|E|$, т.е. снижение эффективности действия автокомпенсатора, определяется не эффективной постоянной времени τ_0 (5), а реальной τ . Видно, что уже в этом простейшем случае судить о динамических свойствах по скорости переходного процесса, т.е. по $\tau_0 = \tau / G$, нельзя.

2. Пусть $\varphi(t)$ — стационарный нормальный случайный процесс с $\langle \varphi(t) \rangle = \varphi_0$, $\langle \varphi(t) \varphi(t+s) \rangle = \sigma^2 r(s) + \varphi_0^2$, $r(0) = 1$, а убывание $r(s)$ характеризуется постоянной времени τ_c . В этом случае эффективность следует оценивать по среднему квадрату $\langle |E|^2 \rangle$. Положив $U_0 = U$, $U_k = U \exp[i\varphi(t)]$, из (4) и (1) получим

$$\begin{aligned} \frac{\langle |E|^2 \rangle}{U^2} &= 1 - \frac{2gU^2}{\tau} \int_0^\infty \left\langle \exp\left[-\frac{z}{\tau_0} - i\varphi(t) + i\varphi(t-z)\right] \right\rangle dz + \\ &+ \frac{g^2 U^4}{\tau^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \left\langle \exp\left[-\frac{u+v}{\tau_0} - i\varphi(t-u) + i\varphi(t-v)\right] \right\rangle dudv. \end{aligned}$$

Поскольку для нормальной случайной функции $\langle \exp[-i\varphi(t) + i\varphi(t-z)] \rangle = \exp[-\sigma^2[1-r(z)]]$,

$$\begin{aligned} \frac{\langle |E|^2 \rangle}{U^2} &= 1 - \frac{2gU^2}{\tau} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{z}{\tau_0} - \sigma^2[1-r(z)]\right] dz + \\ &+ \frac{g^2 U^4}{\tau^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \exp\left[-\frac{u+v}{\tau_0} - \sigma^2[1-r(u-v)]\right] du dv. \end{aligned}$$

Вводя в двойном интеграле новую переменную $z = u - v$ и выполнив однократное интегрирование, получим

$$\frac{\langle |E|^2 \rangle}{U^2} = \frac{1}{G^2} + \frac{G^2 - 1}{G^2} (1 - J), \quad (7)$$

где

$$J = \int_0^\infty \exp\{-x - \sigma^2[1-r(\tau_c x)]\} dx. \quad (8)$$

При отсутствии флуктуаций фазы ($\sigma=0$) или их полной скоррелированности ($r(\tau_0 x)=1$) $J=1$. При этом выходная мощность совпадает с ее статическим значением $|E|^2 = |E_0|^2 = U^2/G^2$. Для оценки относительного снижения эффективности автокомпенсатора введем коэффициент

$$\kappa = \frac{\langle |E|^2 \rangle - |E_0|^2}{|E_0|^2}. \quad (9)$$

При $G \gg 1$ он равен $\kappa \simeq G^2(1-J)$.

Для того чтобы довести выкладки до простых формул, зададимся «треугольной» корреляционной функцией $r(s) = 1 - |s|/\tau_c$, $|s| \leq \tau_c$. Тогда из (8) следует

$$J = \frac{1 + (\tau_0/\tau_c) \exp[-\sigma^2(1 + \tau_0/\tau_c)]}{1 + \tau_0/\tau_c},$$

где $\tau_0 = \tau_c/\sigma^2$ — эквивалентная постоянная времени фазовых флуктуаций. Полагая также $(\tau_0/\tau_c) \exp[-\sigma^2(1 + \tau_0/\tau_c)] \ll 1$, получим

$$1 - J \simeq \frac{\tau}{\tau_0} \left(G + \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-1} \quad \text{и} \quad \kappa \simeq G\tau/\tau_0 \quad \text{при} \quad G \gg 1.$$

Оказалось, что потеря эффективности автокомпенсации определяется в рассмотренном случае не эффективной постоянной времени $\tau_0 = \tau/G$, а гораздо большей величиной τG . Таким образом, условие удовлетворительной динамической работы автокомпенсатора имеет вид $\tau G < \tau_0 = \tau_c/\sigma^2$.

Такие «тяжелые» условия получились из-за того, что мы взяли корреляционную функцию флуктуаций с разрывом производной, что соответствует недифференцируемому процессу $\varphi(t)$ и, соответственно, медленному убыванию его спектра при $\omega \rightarrow \infty$. Если процесс дифференцируем, $r''(0) < \infty$ и условие на постоянную времени облегчается.

3. Более естественным представляется описание переменности $\varphi(t)$ нормальным локально-стационарным процессом с заданной структурной функцией $\langle [\varphi(t) - \varphi(t-s)]^2 \rangle = D_\varphi(s)$. При этом учитываются как «болтанка» фазы, так и ее монотонный дрейф. В этом случае сохраняют силу соотношения предыдущего раздела, если под J вместо (8) понимать следующее выражение:

$$J = \int_0^\infty \exp[-x - (1/2)D_\varphi(\tau_0 x)] dx. \quad (10)$$

Зададимся следующей из закона Колмогорова—Обухова и экспериментальных данных степенной структурной функцией флуктуаций фазы $D_\varphi(x) = (x/\tau_c)^\alpha$. Тогда $J = \int_0^\infty \exp[-x - (1/2)(\tau_0 x/\tau_c)^\alpha] dx$. Если $G \gg 1$, можно считать, что $\tau_0 \ll \tau_c$ и

$$1 - J \simeq \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_0}{\tau_c} \right)^\alpha \int_0^\infty x^\alpha e^{-x} dx = \frac{\Gamma(\alpha + 1)}{2} G^{-\alpha} (\tau/\tau_c)^\alpha.$$

Для коэффициента снижения эффективности автокомпенсатора получим

$$\kappa \simeq \frac{\Gamma(\alpha + 1)}{2} \left(\frac{\tau}{\tau_c} \right)^\alpha G^{2-\alpha}. \quad (11)$$

Для реальных сред (тропосфера, ионосфера, межзвездная среда) $\alpha \simeq 1,6$ и

$$\kappa \simeq (\tau/\tau_c)^{1,6} G^{0,4}$$

— результат средний между случаями линейного во времени дрейфа фазы ($\kappa \sim G^0$)* и стационарных фазовых флуктуаций с медленно убывающим спектром ($\kappa \sim G^1$).

Таким образом, расчеты показывают, что быстрдействие автокомпенсатора должно выбираться не из условия достаточной скорости переходного процесса включения, т. е. $\tau/G \ll \tau_c$, а из гораздо более жестких условий $\tau \ll \tau_c$ или даже $\tau \ll \tau_c/G$.

Не меняет эти выводы и использование адаптивных антенн с числом степеней свободы, превышающим число помех. Для подтверждения сказанного рассмотрим автокомпенсатор с двумя управляемыми комплексными весами при воздействии на него одной помехи.

Пусть напряжения помехи составят U в основном канале и $Ue^{i\varphi_1(t)}$, $Ue^{i\varphi_2(t)}$ в первом и втором компенсационных каналах соответственно. Веса автокомпенсатора W_1 и W_2 при полной идентичности каналов определяются системой уравнений

$$\tau \dot{W} + AW = f, \quad (12)$$

где векторы W и f и матрица A имеют вид

$$W = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \end{pmatrix}, \quad f = \begin{pmatrix} Ge^{-i\varphi_1} \\ Ge^{-i\varphi_2} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 1+G & Ge^{i(\varphi_2-\varphi_1)} \\ Ge^{i(\varphi_1-\varphi_2)} & 1+G \end{pmatrix}.$$

Полагая, что $\varphi_{1,2}(t)$ дифференцируемы, решение системы (12) ищем в виде ряда по степеням τ : $W = W^{(0)} + \tau W^{(1)} + \tau^2 W^{(2)} + \dots$. Ограничиваясь квадратичными по τ членами, получим для W_1 и W_2 :

$$W_{1,2}^{(0)} = e^{-i\varphi_{1,2}}, \quad W_{1,2}^{(1)} = W_{1,2}^{(0)} [(1+G)\dot{\varphi}_{2,1} - G\dot{\varphi}_{1,2}] (1+2G)^{-1},$$

$$W_{1,2}^{(2)} = W_{1,2}^{(0)} [-i(1+2G+2G^2)\ddot{\varphi}_{2,1} + i(2G+2G^2)\ddot{\varphi}_{1,2} - (1+G)^2\dot{\varphi}_{2,1}^2 + G(1+G)\dot{\varphi}_{1,2}^2 + G\dot{\varphi}_{1,2}\dot{\varphi}_{2,1}] (1+2G)^{-2}.$$

Выходное напряжение $E = U(1 - W_1 e^{i\varphi_1} - W_2 e^{i\varphi_2})$ равно при этом

$$E = U \left\{ \frac{1}{1+2G} + \frac{\tau^2 G}{(1+2G)^3} [(1+G)(\dot{\varphi}_1^2 + \dot{\varphi}_2^2) - 2G\dot{\varphi}_1\dot{\varphi}_2] - \frac{i\tau G}{(1+2G)^2} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \right\}.$$

Определяя эффективность автокомпенсатора коэффициентом κ (9), получим

$$\kappa = \frac{\tau^2 G}{(1+2G)^3} [(3G+2)\langle \dot{\varphi}_1^2 + \dot{\varphi}_2^2 \rangle - 2G\langle \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \rangle]. \quad (13)$$

Если $\varphi_{1,2}(t)$ — дифференцируемый нормальный случайный процесс с $\langle \varphi(t) \rangle = 0$, $\langle \varphi(t)\varphi(t+s) \rangle = \sigma^2 r(s)$, то $\langle \dot{\varphi}^2 \rangle = -\sigma^2 r''(0) = \sigma^2/\tau_c^2 = \tau_0^2$, где τ_c — характерное время флуктуаций, $\tau_0 = \tau_c/\sigma^2$ — эквивалентная постоянная времени флуктуаций.

При $G \gg 1$ и $\langle \varphi_1 \varphi_2 \rangle = 0$ $\kappa \simeq 1,5\tau^2/\tau_0^2$. Если флуктуации фазы в компенсационных каналах полностью скоррелированы, $\langle \varphi_1 \varphi_2 \rangle = \langle \varphi^2 \rangle$ и $\kappa \simeq \tau^2/\tau_0^2$, т. е. эффективность растет незначительно. Это естественно, так как основную роль играет фазовый набег между основными и компенсационными каналами.

Исследование автокомпенсаторов показывает, что

1) их эффективность не следует оценивать по скорости переходного процесса;

2) постоянная времени должна определяться не только реальной скоростью флуктуаций фаз, но и видом спектра этих флуктуаций;

* Такой же результат получается, если $r(s) = 1 - as^2$ при $s \rightarrow 0$, т. е. спектр флуктуаций фазы достаточно быстро убывает при $\omega \rightarrow \infty$,

3) в худшем случае, когда спектр флуктуаций медленно убывает с ростом частоты, для сохранения эффективности компенсации помехи постоянная времени автокомпенсатора должна быть уменьшена в G раз (где G — эффективный коэффициент усиления в петле обратной связи автокомпенсатора).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пистолькорс А. А. // Сб. Антенны / Под ред. А. А. Пистолькорса. — М.: Связь. Вып. 28. С. 13.
2. Позументов И. Е. // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. № 6. С. 1187.

Харьковский политехнический
институт,
Радиоастрономический институт
АН УССР

Поступила в редакцию
19 февраля 1987 г.,
после переработки
20 ноября 1987 г.

EFFICIENCY OF A CORRELATIVE FEEDBACK AUTOCOMPENSATOR WITH FLUCTUATIONS IN THE ARRIVAL ANGLES OF THE NOISE

L. G. Sodin, A. S. Mazmanishvili

The output power of an adaptive interference compensator is analysed for the conditions of fluctuating arrival angles (phases) of the noise. As has been found, the time of the compensator should be much smaller than is predicted by the analyses of the transient switch on process.

ИНФОРМАЦИЯ О НОВЫХ КНИГАХ

Бреховских Л. М., Годин О. А. Акустика слоистых сред. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989 (II кв.). — 32 л.

Посвящена теории распространения звуковых волн в образованиях слоистого характера как в искусственных структурах, употребляемых в ультразвуковой технике и акустоэлектронике, так и в природных средах — океане и атмосфере, имеющих четко выраженную горизонтальную стратификацию. Дан вывод различных форм волнового уравнения для слоисто-неоднородной жидкости. Описание упругих волн в дискретно-слоистом твердом теле ведется на основе матричного формализма, излагается методика построения асимптотических разложений волновых полей на основе эталонных уравнений и эталонных интегралов.

Для научных работников — физиков и геофизиков, а также для инженеров, аспирантов и студентов старших курсов вузов.

Окс Е. А. Спектроскопия плазмы с квазимонохроматическими электрическими полями. — М.: Энергоатомиздат, 1989 (II кв.). — 15,5 л.

Изложены основы спектроскопии плазмы, в которой имеются квазимонохроматические электрические поля (КЭП) — поля продольных колебаний плазмы (ленгмюровских и др.) или проникающее извне когерентное излучение. Исследован новый класс плазменно-спектроскопических задач — об излучении (спонтанном) квантовой системы, взаимодействующей одновременно с сильным КЭП и плазменной средой. Разработаны различные методы измерений параметров внутриплазменных КЭП и плазменной среды. Обсуждены эксперименты и наблюдения, в которых эти методы были применены для диагностики лабораторной или космической плазмы.

Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов старших курсов, занимающихся спектроскопической диагностикой лабораторной или космической плазмы.